

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 11-145549

(43)Date of publication of application : 28.05.1999

(51)Int.Cl.

H01S 3/18

(21)Application number : 09-304590

(71)Applicant : NEC CORP

(22)Date of filing : 06.11.1997

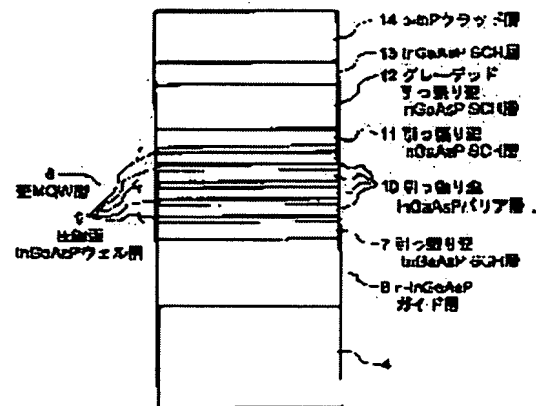
(72)Inventor : MORIMOTO TAKUO

## (54) MULTIPLE QUANTUM WELL STRUCTURE, AND OPTICAL SEMICONDUCTOR DEVICE AND LIGHT MODULATOR HAVING THE SAME

## (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To transport hole carriers in an MQW(multiple quantum well) structure to be bulk-like, while the quantum effects of the MQW structure are maintained.

SOLUTION: In a semiconductor light modulator in which an n-type InGaAsP guide layer 6, a strained MQW layer 8, a graded tensile-strained InGaAsP SCH layer 12, and a p-InP clad layer 14 are successively formed on an n-type InP substrate 4, the compressive strain and tensile strain of a compressive-strained InGaAsP well layer 9 and a tensile-strained InGaAsP barrier layer 10 are adjusted to 1.5% by having their group III compositions change reversely from the same InGaAsP composition. When the heavy hole level of the well layer 9 and the light hole level of the barrier layer 10 are adjusted to the same height in this way, the transfer of hole carriers in the strained MQW layer 8 is set bulk-like.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]	06.11.1997
[Date of sending the examiner's decision of rejection]	20.09.2000
[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]	
[Date of final disposal for application]	
[Patent number]	3288283
[Date of registration]	15.03.2002
[Number of appeal against examiner's decision of rejection]	2000-16709
[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]	19.10.2000
[Date of extinction of right]	15.03.2005

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-145549

(43) 公開日 平成11年(1999) 5月28日

(51) Int.Cl.<sup>6</sup>

H 0 1 S 3/18

識別記号

F I

H 0 1 S 3/18

審査請求 有 請求項の数14 O L (全 10 頁)

(21) 出願番号 特願平9-304590

(22) 出願日 平成9年(1997)11月6日

(71) 出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(72) 発明者 森本 卓夫

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

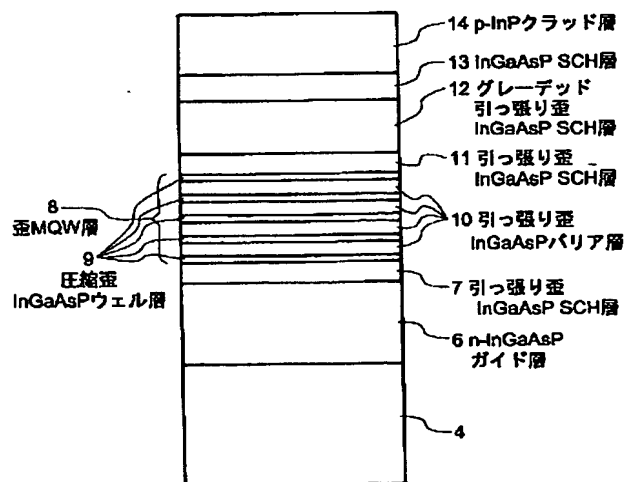
(74) 代理人 弁理士 山下 穰平

(54) 【発明の名称】 多重量子井戸構造とこれを有する光半導体装置と光変調器

(57) 【要約】

【課題】 MQW構造の量子効果を保持しつつ、MQW内でのホールキャリア輸送をバルクライクとする。

【解決手段】 n型InP基板4上にn-InGaAsPガイド層6、歪MQW層8、グレーデッド引っ張り歪InGaAsP SCH層12、p-InPクラッド層14がある半導体光変調器で、圧縮歪InGaAsPウェル層9と引っ張り歪InGaAsPバリア層10を同じ組成のInGaAsPからIII族組成を逆に変化させて、1.5%の圧縮歪と引っ張り歪とする。このようにして、ウェル層のヘビーホール準位とバリア層のライトホール準位を等しい高さにおくことにより、歪MQW層8内のホールキャリアの輸送をバルクライクとする。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 圧縮歪井戸層と引っ張り歪障壁層よりなる多重量子井戸構造において、前記圧縮歪井戸層のヘビーホール準位と前記引っ張り歪障壁層のライトホール準位が等しいことを特徴とする多重量子井戸構造。

【請求項 2】 上記多重量子井戸構造において、前記圧縮歪井戸層の歪量と前記引っ張り歪障壁層の歪量が、逆の符号で絶対値が等しいことを特徴とする請求項 1 記載の多重量子井戸構造。

【請求項 3】 上記多重量子井戸構造が、III-V 族化合物半導体よりなることを特徴とする請求項 1 又は請求項 2 記載の多重量子井戸構造。

【請求項 4】 上記多重量子井戸構造において、前記圧縮歪井戸層と前記引っ張り歪障壁層の V 族組成が等しく、III 族組成のみ異なることを特徴とする請求項 3 記載の多重量子井戸構造。

【請求項 5】 上記多重量子井戸構造において、前記圧縮歪井戸層の InGaAsP と前記引っ張り歪障壁層 InGaAsP の V 族の As 及び P の組成が等しく、III 族の In 及び Ga の組成のみ異なることを特徴とする請求項 3 又は 4 に記載の多重量子井戸構造。

【請求項 6】 圧縮歪井戸層と引っ張り歪障壁層よりなる多重量子井戸構造を有する光半導体装置において、前記圧縮歪井戸層のヘビーホール準位と前記引っ張り歪障壁層のライトホール準位が等しいことを特徴とする光半導体装置。

【請求項 7】 上記多重量子井戸構造において、前記圧縮歪井戸層の歪量と前記引っ張り歪障壁層の歪量が、逆の符号で絶対値が等しいことを特徴とする請求項 6 記載の光半導体装置。

【請求項 8】 上記多重量子井戸構造が、III-V 族化合物半導体よりなることを特徴とする請求項 6 又は請求項 7 に記載の光半導体装置。

【請求項 9】 上記多重量子井戸構造について、前記圧縮歪井戸層と前記引っ張り歪障壁層の V 族組成が等しく、III 族組成のみ異なることを特徴とする請求項 8 に記載の光半導体装置。

【請求項 10】 上記多重量子井戸構造について、前記圧縮歪井戸層の InGaAsP と前記引っ張り歪障壁層 InGaAsP の V 族の As 及び P の組成が等しく、III 族の In 及び Ga の組成のみ異なることを特徴とする請求項 8 又は 9 に記載の光半導体装置。

【請求項 11】 請求項 1 乃至 5 のいずれか 1 項に記載の多重量子井戸構造を有したことを特徴とする光変調器。

【請求項 12】 請求項 11 に記載の光変調器において、回折格子を備えた DFB レーザ部と、前記多重量子井戸構造を備えた変調器部と、前記 DFB レーザ部と変調器部とを光学的に伝通する電極分離部とを備えたこと

を特徴とする光変調器。

【請求項 13】 請求項 6 乃至 10 のいずれか 1 項に記載の光半導体装置を有したことを特徴とする光変調器。

【請求項 14】 請求項 13 に記載の光変調器において、回折格子を備えた DFB レーザ部と、前記多重量子井戸構造を備えた変調器部と、前記 DFB レーザ部と変調器部とを光学的に伝通する電極分離部とを備えたことを特徴とする光変調器。

## 【発明の詳細な説明】

10 【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、多重量子井戸構造及びこれを有する光半導体装置に関し、特に、井戸層、障壁層に、逆の歪がかかった、歪多重量子井戸構造を有する光半導体装置及び光変調器に関する。

【0002】

【従来の技術】 従来、バルクの活性層を多重量子井戸構造（以下、MQW 構造ともいう。MQW は、Multi-Quantum Well の略。）の活性層に変えていくことで、半導体レーザの特性は、著しく向上してきた。また、光変調器においても、多重量子井戸構造により、量子閉じこめシユタルク効果（以下、QCSE という。QCSE とは、Quantum Confined Stark Effect の略である。）による大きな光吸収を得ることができる。

【0003】 しかし、多重量子井戸構造には、井戸層（以下、ウェル層という。）間のキャリア輸送という、バルクにはない特有の問題がある。特に、有効質量の重いホールは、ウェル間のキャリア輸送が十分に行われない。半導体レーザに多重量子井戸構造を適用した場合、レーザ発振後の注入電流増加に伴い、ウェル間のキャリア不均一が増大しやすく、このため、活性層のトータル

30 のキャリア密度が上昇する現象が発生する。このことは、利得飽和現象と等価的な振る舞いをもたらすため、変調帯域が伸びないなどの欠点を生じさせる。

【0004】 また、光変調器においては、光の吸収により発生したホールキャリアの引き抜きが十分行われず、高速変調時の消光比が十分とれないという問題を引き起こす。

【0005】 このような欠点を解消するために、障壁層（以下、バリア層という。）に引っ張り歪を導入することが提案されてきた。

【0006】 半導体レーザにおいては、特開平 4-234184 号公報において、InP 基板上の InGaAsP 系の MQW 構造の例がある。InGaAsP 系の材料では、伝導帯のバンド不連続が小さく、価電子帯のバンド不連続が大きいため、電子のオーバフロー、ホールの不均一注入が大きな問題となる。そこで、引っ張り歪バリアを導入すれば、伝導帯のバンド不連続は大きくなり、ホールのバンド不連続は小さくなるため、閾値が低減し、また、10GHz までの変調帯域向上が可能となる。

【0007】また、歪応力補償の観点から、引っ張り歪バリアは、圧縮歪ウェルとともに使われることが多く、1995年、ジャーナル オブ アプライド フィジックス、第15巻、H.Ohashi, et al, "1.3  $\mu\text{m}$  InAsP compressively strained multiple-quantum-well lasers for high-temperature operation", (J. Appl. Phys., 15, p. 4119 (1995)) では、InAs 0.52 P 0.48 圧縮歪ウェルと、-0.6%歪で1.1  $\mu\text{m}$ のバンドギャップに対応するInGaAsPバリアの組み合わせの歪補償MQW構造について述べている。これと同様の歪MQWにより、1995年電子情報通信学会予稿集、大橋他、「高温動作InP系圧縮歪MQWレーザ」では、優れた高温特性が報告している。

【0008】一方、光変調器においても、1995年、エレクトロニクス レターズ、第31巻、K.Morito, R. Sahara, K. Sato, Y. Kotaki and H. Soda, "High power modulator integrated DFB laser incorporating strain-compensated MQW and graded SCH modulator for 10Gbit/s transmission", (Electronics Letters, 31, p. 975 (1995)) や、1996年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会C-308の小滝「電界吸収型光変調器集積化DFBレーザ」において、圧縮歪ウェル、引っ張り歪バリアの光変調器が報告されている。この報告で述べられているように、変調器では、ホールバイルアップによる変調特性の劣化を招かないように、価電子帯バンド不連続を小さくすることが設計上重要である。この価電子帯バンド不連続は、MQWからp-InPにかけて小さくする必要がある。このように設計することにより、ホールキャリアの引き抜き時間を短くすることができる。以下、このような集積型光変調器について、図面を参照して詳細に説明する。

【0009】集積型光変調器は、斜視図で図5のようになっている。集積型光変調器は、DFBレーザ部1、電極分離部2、変調器部3よりなる。DFB (Distributed Feed-Back) レーザは、分布帰還型レーザとも呼ばれ、図5に示すn型InP基板4の上の回折格子5により、単一モードのレーザ光を発振する。変調器部3は、このDFBレーザ光をON、OFFし、デジタル信号を生成する機能を有している。なお、本集積型光変調器の周辺構造として、保護膜としての酸化シリコン膜20、ポリイミド21、電源電流を注入するp側電極22、基板電極としてのn側電極23、反射面に施される無反射のARコーティング膜24が備えられている。

【0010】この種の従来の光変調器の歪MQWとその周囲は、断面図で、図8のようになっている。図8において、半導体レーザの一例として基板側から順次、n型InP基板4、組成n-InGaAsPのガイド層6、組成InGaAsPの圧縮歪ウェル層9、組成InGaAsPの引っ張り歪バリア層10、組成InGaAsPのSCH層111、組成InGaAsPのグレーデッド

SCH層112、組成InGaAsPのSCH層13、組成p-InPのクラッド層14とで構成される。

【0011】このInP/InGaAsPのエピタキシャル層構造は、有機金属気相結晶成長（以下、MOVPEとよぶ。）法で行う。MOVPE法の原料ガスは、トリメチルインジウム（以下、TMIと呼ぶ。）、トリメチルガリウム（以下、TMGという。）、トリメチルアルミニウム（以下、TMAIという。）、アルシン（以下、AsH<sub>3</sub> という。）、フォスフィン（以下、PH<sub>3</sub> という。）を用いる。また、有機金属は、水素のバブリングにより供給する。ドーピングについては、適宜、ジシラン（以下、Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub> という。）、ジメチルジंक（以下、DMZnという。）を水素で希釈したガスを用いる。

【0012】層構造は、表面の面方位が(100)面のn型InP基板4上に、バンドギャップ波長が1.15  $\mu\text{m}$ の（以下、1.15  $\mu\text{m}$ 組成の、という。）n-InGaAsPガイド層6が50nm~100nm、その上に歪MQW層8があり、歪MQW層8は、7層の圧縮歪InGaAsPウェル層9と、その間の引っ張り歪InGaAsPバリア層10からなっている。歪MQW層8の上には、1.15  $\mu\text{m}$ 組成のInGaAsP SCH層111が10nm、1.15  $\mu\text{m}$ から1.0  $\mu\text{m}$ まで組成を変化させたグレーデッドInGaAsP SCH層112が50nm、1.0  $\mu\text{m}$ 組成InGaAsP SCH層13が10nm、p-InPクラッド層14がある。SCHとは、Separate Confinement Heterostructure（分離閉じ込めヘテロ構造）のことであり、導波光を閉じ込める機能を有している。

【0013】圧縮歪InGaAsPウェル層9の歪量は+0.5%で、厚さは9nmである。引っ張り歪InGaAsPバリア層10の歪量は-0.3%で、厚さは5.1nmである。DFBレーザの発振波長が1.55  $\mu\text{m}$ であるのに対し、この歪MQW層8の遷移波長は、1.47  $\mu\text{m}$ であり、逆バイアスをかけたときに1.55  $\mu\text{m}$ 光を吸収できるようになる。

【0014】図9はこの層構造のバンドダイアグラム図である。光変調器に逆バイアスをかけると、DFBレーザからの光は、歪MQW層8で吸収され、InGaAsPウェル層9内に、電子キャリアとヘビーホールキャリアが発生する。電子の有効質量は軽いため、逆バイアスにより容易にn型InP基板4に輸送されるが、ホールは重いためバンド不連続点で、キャリアがバイルアップされないようなバンドラインナップを設計する必要がある。

【0015】まず、歪MQW層8内でのホールキャリアの輸送であるが、各ウェル圧縮歪InGaAsPウェル層9内のホールキャリアは、複数の引っ張り歪InGaAsPバリア層10の障壁を乗り越えて、InGaAsP SCH層111に輸送される必要がある。このキャ

リア引き抜きが速やかに起こるためには、ウェルとバリアの間の価電子帯のバンド不連続が小さければ良い。これを達成するために、単純に、バリアのバンドギャップを小さくすると、伝導帯のバンド不連続も小さくなるため、QCSEが十分でなくなり、大きな消光比が得られなくなる。これを解決するため、図9下段に示すように、バリア層10に引っ張り歪を導入して、電子の障壁を高く、ホールの障壁を小さくしている。引っ張り歪をかけると、ウェル層9とヘビーホール準位とバリア層10のライトホールバンド端が近づき、上に述べた歪MQW層8の例では、ホール側のバンド端不連続は74meVまで低減できている。

【0016】また、圧縮歪ウェル／引っ張り歪バリアの組み合わせを用いるのは、応力を補償するため、結晶成長上、欠陥の導入を招きにくいという利点もある。

【0017】変調器の場合、MQW内のキャリア輸送だけでなく、SCH層からpクラッドへのキャリア引き抜きも無視できない。1.15μmの組成InGaAsP SCH層111と1.0μmの組成InGaAsP SCH層13の間は、グレーデッドInGaAsP SCH層112の挿入により、約100meVの価電子帯バンド不連続を解消している。残るは、InGaAsP SCH層13とp-InPクラッド層14の間の価電子帯バンド不連続であるが、これは、66meVと小さく、InP側がpドーピングしてあるため、ホールキャリアはこのヘテロギャップを乗り越えることができる。

【0018】このような変調器構造を用いた集積型光変調器では、DFBレーザ部1への戻り光が発振波長揺らぎを引き起こさないように、変調器部3の前端面は、無反射コーティング24を施す。また、十分な消光比を得るため、変調器長は、250μmとする。このような設計の集積型光変調器では、10mW出力でも、2Vのバイアスで、15dBという十分な消光比が得られる。

【0019】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、まず第1の問題点は、光変調器において、光吸収により発生したホールキャリアの引き抜きが十分速やかに行われないために、DCバイアス時に比べ、高速変調時の消光比が十分大きく取れないという点である。DCバイアス時では、2Vバイアス時の消光比が15dBとれても、動的消光比は10dBに劣化する。

【0020】すなわち、MQW構造のキャリア輸送が考えられる。これは、バルクの変調器では、DC時の消光比と動的消光比との間の差が比較的小さいのに対し、MQW構造の変調器では、無視できない差が生じていることから推察される。上述した従来のMQW構造においても、歪補償型により、ホールのバンド不連続を低減しているが、それでもp側のSCH層をグレーデッド化したほどには徹底されていない。しかもホールキャリアは何層ものバリア層を乗り越えなければならないため、この

障壁がホールキャリア引き抜きを律速する。

【0021】変調器長が250μmで消光比が15dBのとき、変調器のDFBレーザ側50μmで3dBの光吸収があることになる。レーザからのパワーが10mWとすると、50μmの長さで5mWの光を吸収するため、そこに4mAの光電流が発生する。このような大きな発生キャリアがMQWからスムーズに出れない場合、空間電荷効果によりキャリアを引き抜く電界が弱くなるため、相当長い時間キャリアがウェル内に滞留すると考えられ、ホールキャリアの引き抜きが遅く、消光比が小さくなる。

【0022】また、第2の問題点は、MQW構造のレーザにおいて、変調帯域が十分に伸びないという問題がある。というのは、MQW構造には、キャリアのウェル間輸送時間を必要とするというバルクのレーザにはない問題があり、その上、ウェル間のキャリア密度の不均一が電流注入が増えるにつれ悪化するため、実質的な利得飽和現象がおこるためである。利得飽和係数が大きい時のレーザの変調特性というのは、緩和振動での持ち上がりが抑制され、3dB帯域が低下するかたちになる。このため、キャリア不均一注入がレーザの帯域の悪化につながることになる。

【0023】このことから、波長チャーピングが問題にならないような、短距離の1.3μm帯の光通信において、10Gb/sを越える高速の直接変調を利用しようとする、このような変調帯域の伸び悩みが大きな問題となる。

【0024】本発明の目的は、多重量子井戸構造で生ずるウェル間のキャリア輸送の問題を完全に除くように、MQW構造の特にホールのキャリア輸送をバルクライクにすることである。その結果として、半導体レーザにおいては、ホールキャリアの不均一注入が行われなようにし、光変調器においては、発生ホールキャリアの引き抜きが速やかに行われるようにすることである。

【0025】以上により、半導体レーザでは、歪MQW半導体レーザの閾値電流の低減、スロープ効率の向上、高出力、高温特性の向上し、また、変調帯域も向上させることが、半導体レーザのデバイス特性での目的である。また、光変調器では、発生ホールキャリアの引き抜き時間を短くすることにより、消光比を向上させることが目的である。

【0026】

【課題を解決するための手段】本発明の多重量子井戸構造は、(1)圧縮歪井戸層と引っ張り歪障壁層よりなる多重量子井戸構造において、圧縮歪井戸層のウェル層のヘビーホール準位と、引っ張り歪障壁層のバリア層のライトホール準位が等しい、(2)また、上記多重量子井戸構造において、圧縮歪井戸層の歪量と、引っ張り歪障壁層の歪量が、逆の符号で絶対値が等しい、(3)また、前記の(1)、(2)の各項の多重量子井戸構造

が、III-V族化合物半導体よりなる、(4) また、前記の(3)の多重量子井戸構造において、圧縮歪井戸層と引っぱり歪障壁層のV族組成が等しく、III族組成のみ異なる、ことを特徴とする。

【0027】また、本発明の光半導体装置は、上記(1)～(4)の多重量子井戸構造を有していることを特徴とする。

【0028】また、本発明の光変調器は、上記(1)～(4)の多重量子井戸構造又は光半導体装置を有していることを特徴とする。さらに、本発明の光変調器は、回折格子を備えたDFBレーザ部と、前記多重量子井戸構造を備えた変調器部と、前記DFBレーザ部と変調器部とを光学的に伝通する電極分離部とを備えたことを特徴とする。

【0029】〔作用〕III-V族化合物半導体においては、歪をかけると、価電子帯エネルギーは、ヘビーホールとライトホールに分裂する。V族組成一定で、III族組成を変化させた場合、圧縮歪では、ヘビーホール準位が上がって、ライトホール準位が下がり、伝導帯端は下がる。引っぱり歪では逆である。従って、ウェルとバリアで、V族組成を等しくし、III族組成を変えて、それぞれ、圧縮歪、引っぱり歪とした場合、電子とヘビーホールは、ウェル層に量子閉じ込め単位ができるが、ライトホールでは、バリア層側に閉じ込め単位ができる。

【0030】そして、適当な歪量と層厚で、ウェル層内のヘビーホール準位と、バリア層内のライトホール準位を等しくすることができる。このとき、フォノンエネルギーのやりとり無しに、ウェル層内のヘビーホールとバリア層内のライトホールの間には互いに遷移できるために、MQW構造内でホールキャリアはなんの障壁も無く動き回れることができ、実質的にバルクの中のキャリア輸送と同等になる。

【0031】キャリア輸送においては、ホールはバルクライクとなるが、波動関数的には、量子閉じ込めを受けている。ウェル層内のヘビーホールは、バリア層のヘビーホール準位を障壁として、量子閉じ込めされた固有状態が存在する。このため、光吸収時の量子閉じ込めシュタルク効果は健在である。光のエネルギーを受けて、電子-ホール対が生成されるときは、量子井戸として機能し、いったんキャリアが生成された後は、ホールの振る舞いはバルクライクになるのである。

【0032】例えば、長波光通信用の材料であるInP基板上のInGaAsP系では、無歪のInGaAsPからInリッチにして歪量を1.5%としたものをウェル層、Gaリッチにして歪量を-1.5%にしたものをバリア層とすると、ヘビーホールとライトホールのエネルギー準位は約100meV分裂し、ウェル層のヘビーホールバンド端と、バリア層のライトホールバンド端をほぼ等しくすることができる。ヘビーホールの量子閉じ込めとしては、ウェル層のヘビーホールバンド端に対し

て、バリア層のヘビーホールバンド端は約100meVの高さがあるため、十分な量子閉じ込め効果が得られる。一方、電子側のバンド不連続は、200～300meVあるため、有効質量の軽い電子に対しても十分な量子閉じ込め効果が得られる。

【0033】いま、例として、ウェル層とバリア層でV族組成一定としたが、これは必ずしも必要ではない。しかし、1.5%という歪量では、臨界膜厚が小さく、結晶成長時に結晶欠陥が導入される危険が高い。そこで、V族組成一定という条件を課すことにより、結晶成長の界面切換えを容易にして、結晶欠陥の導入を防止する。実際、MO-VP E成長では、基板を保持するサセプタからのAs再蒸発等が問題となり、ウェル/バリア間でのV族切換えは、かなり難しい。これをウェルとバリアの組成をV族組成が等しいものから選ぶと、V族切換えは必要なくなり、このような問題を排除することができる。

【0034】このようにして得られたMQW構造では、キャリア輸送ではバルクライク、光との相互作用では量子効果を有するため、半導体レーザや光変調器がバルクからMQW構造に進化したときに失った特性を回復しつつ、得られたすばらしい特性をそのまま享受し続けることができる。

【0035】バルクからMQWに移行したときにおきるデメリットとは、キャリアの不均一であり、この不均一のため、キャリア輸送時間の遅延、実効的な利得飽和を招いた。このため、光変調器における動的消光比や、半導体レーザにおける変調帯域の伸びなど、かえって悪化した特性がある。本発明の多重量子井戸構造は、上に述べた理由により、このような問題を根本的に解決する。

【0036】

〔発明の実施の形態〕〔第1の実施形態〕次に、本発明の実施の形態について図面を参照して詳細に説明する。

【0037】図1は、本発明の光変調器の多重量子井戸構造の断面図である。図5は、この光変調器の多重量子井戸を組み込んだ集積型光変調器の斜視図である。

【0038】図5を参照すると、この集積型光変調器は、400μm長のDFBレーザ部1、50μm長の電極分離部2、250μm長の変調器部3からなる。これらは、(100)の面方位のn型InP基板4上に形成されており、DFBレーザ部1では、n型InP基板4上にピッチが243nmの回折格子5が形成され、1.55μm波長の光が単一モードで発振する機能がある。なお、本集積型光変調器の周辺構造として、保護膜としての二酸化シリコン膜20、ポリイミド21、電源電流を注入するp側電極22、基板電極としてのn側電極23、反射面に施される無反射のARコーティング膜24が備えられている。

【0039】つぎに、図1を参照すると、変調器部3の半導体結晶の層構造は、以下のようになっている。

10

20

30

40

50

【0040】まず、 $n$ 型  $\text{InP}$  基板4の上に、厚さが20～200nmの $n$ - $\text{InGaAsP}$ ガイド層6、厚さが5～50nmの引っ張り歪 $\text{InGaAsP}$  SCH層7、歪MQW層8があり、歪MQW層8は、層数が3～10の圧縮歪 $\text{InGaAsP}$ ウェル層9と引っ張り歪 $\text{InGaAsP}$ バリア層10からなる応力歪補償型の歪MQW層である。歪MQW層8の上には、順にバンドギャップが大きくなっていく、引っ張り歪 $\text{InGaAsP}$  SCH層11、グレーデッド引っ張り歪 $\text{InGaAsP}$  SCH層12、 $\text{InGaAsP}$  SCH層13、 $p$ - $\text{InP}$ クラッド層14が積層されており、このSCH層のトータル層厚は30～200nmである。

【0041】図2は、この層構造に対応するバンドダイアグラム図である。本発明の歪MQW層にとって最低限備える必要のある第1の特徴は、ウェル層内のヘビーホール準位とバリア層内のライトホール準位が等しくなっていることである。望ましくは、ウェル層9のヘビーホールバンド端と、バリア層10のライトホールバンド端が等しいという第2の特徴を備えると良い。第1の特徴と第2の特徴は、ウェル層9の厚さとバリア層10の厚さを適当に選ぶと両立させることができる。

【0042】このような特徴の上に、ウェル層9のライトホールバンド端とバリア層10のヘビーホールバンド端をほぼ等しくすれば、バリア準位にあるホールキャリアも歪MQW層8内を輸送されやすいという利点が生ずる。

【0043】このような歪MQW層8のバンドラインナップを得る方法として、ウェル層とバリア層を、同じ組成の無歪 $\text{InGaAsP}$ から、III族組成のみ変化させて、それぞれ逆の歪を、同じ量だけかけると良い。このとき、ほぼ上に述べた特徴を有したMQWとなっている。歪量としては1.2%～1.8%が適当である。この歪量の下限は、良好な量子閉じ込めができる障壁高さから、歪量の上限は、結晶欠陥が入らないための条件から決まってくる。

【0044】次に、本発明の実施の形態の製造方法について、図6、図7を参照して詳細に説明する。

【0045】まず、最初に、表面の面方位が(100)面の $n$ 型 $\text{InP}$ 基板4上の、長さ400 $\mu\text{m}$ のDFBレーザ部1に、(011)面に平行な溝がピッチ243nmで並んでいる回折格子5を形成する。次に、間隙が1.8 $\mu\text{m}$ の2対の二酸化シリコン膜15のストライプマスクを形成する。この二酸化シリコン膜15の幅は、DFBレーザ部1で10 $\mu\text{m}$ 、変調器部3で4 $\mu\text{m}$ であり、変調器部3のDFBレーザ部1と反対側の端30 $\mu\text{m}$ の部分においては、2対の二酸化シリコン膜15が閉じる形状とする。変調器部3の長さは250 $\mu\text{m}$ であり、変調器部3とDFBレーザ部1の間には二酸化シリコン膜15の幅が連続的に変化する遷移領域部が50 $\mu\text{m}$ の長さで挿入されている。この二酸化シリコン膜15

は、 $\text{MO-VPE}$ での成長阻止マスクとなり、このマスク幅をDFBレーザ部1と変調器部3で変化させることにより、MQWの遷移準位を変化させることができる。

【0046】この $\text{MO-VPE}$ の選択成長では、 $\text{InP}$ と $\text{InGaAsP}$ のエピタキシャル成長を行うが、原料ガスは、 $\text{TMI}$ 、 $\text{TMG}$ 、 $\text{AsH}_3$ 、 $\text{PH}_3$ を用い、有機金属は、水素のパブリックにより供給する。ドーピングについては、適宜、 $\text{Si}_2\text{H}_6$ 、 $\text{DMZn}$ を水素で希釈したガスを用いる。また、成長圧力は、100 Torrとする。

【0047】二酸化シリコン膜15形成後、上述の図1の層構造で、 $\text{MO-VPE}$ 選択成長を行う。MQW構造の遷移波長は、DFBレーザ部1で1.56 $\mu\text{m}$ 、変調器部3で1.47 $\mu\text{m}$ となる。 $\text{MO-VPE}$ では、(111)B面の成長速度が遅いため、一般に、選択成長側面には、(111)B面が形成されるが、変調器部3射出部のウィンドウ部16の側面は、(111)A面が形成される。

【0048】歪MQW層8の組成として、圧縮歪 $\text{InGaAsP}$ ウェル層9と引っ張り歪 $\text{InGaAsP}$ バリア層10のV族組成を一定としたものを採用したときは、歪MQW層8の $\text{MO-VPE}$ 選択成長時に、 $\text{AsH}_3$ 、 $\text{PH}_3$ は一定流量で供給し、III族流量のみウェル/バリア界面で切り換えれば良い。このような成長法をとることにより、サセプタからの $\text{AsH}_3$ 再蒸発などの問題を考慮する必要がなくなり、強歪の歪補償型MQWを成長することができる。このようにV族組成一定とすると良好な結晶が得られることについては、CNETによる1993年、第5回インターナショナル コンファレンス オン インジウム フォスファイドアンド リレーテッド マテリアルズの論文番号TuB1 (5th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, paper TuB1(1993))によって、知られている。

【0049】次に、図7を参照しつつ、選択成長リッジ部の両脇1 $\mu\text{m}$ の二酸化シリコン膜15を除去する。ウィンドウ部16においても、同じ位置まで二酸化シリコン膜15を除去する。その上で、 $p$ - $\text{InP}$ 埋込み層17、 $p$ - $\text{InGaAsP}$ コンタクト層18、 $p$ - $\text{InGaAs}$ コンタクト層19を成長する。そして、リッジ部以外の平坦成長部のエピタキシャル層を除去する。

【0050】次に、電極分離部2の $p$ - $\text{InGaAsP}$ コンタクト層18、 $p$ - $\text{InGaAs}$ コンタクト層19を除去し、DFBレーザ部1、変調器部3の選択成長上面でのみ開口した二酸化シリコン膜20を図7のように、形成する。

【0051】次に、ポリイミド21を選択成長の上面が露出するように形成し、 $p$ 側電極22を、DFBレーザ部1、変調器部3に形成する。次に、裏面研磨を行って、ウェハの厚さを120 $\mu\text{m}$ にしてから、 $n$ 側電極

23を形成する。

【0052】最後に、端面劈開を行い、図5のように、変調器部3側の端面にシリコン窒化膜からなるARコーティング膜24を施す。DFBレーザ部1側の端面は二酸化シリコン膜/アモルファスシリコン膜/二酸化シリコン膜の3層コーティングにより、75%の端面反射率を得るようにする。

【0053】以上の工程により作成された、ウインドウ部16+ARコーティング膜24の構造により、変調器部3端面の反射率は、0.04%以下にすることができる。

【0054】以上の実施の形態は、InP基板上のInGaAsPウェル/InGaAlAsPバリアや、その他、一般のIII-V族化合物半導体にも、もちろん適用することができる。

【0055】

【実施例】次に本発明の実施例について図面を参照して詳細に説明する。

【0056】図1を参照すると、本発明の実施例は、変調器部3のエピ構造が、n型InP基板4の上に、厚さが100nmで1.0 $\mu$ m組成のn-InGaAsPガイド層6と、厚さがそれぞれ15nmの引っ張り歪InGaAsP SCH層7と引っ張り歪InGaAsP SCH層11にはさまれた歪MQW層8があり、その上には、グレーデッド引っ張り歪InGaAsP SCH層12、厚さ20nmで1.0 $\mu$ m組成のInGaAsP SCH層13、p-InPクラッド層14が積層されている。

【0057】歪MQW層8は、5層の圧縮歪InGaAsPウェル層9と、引っ張り歪InGaAsPバリア層10からなる応力歪補償型の歪MQWである。引っ張り歪InGaAsP SCH層7と引っ張り歪InGaAsPバリア層10と引っ張り歪InGaAsP SCH層11の組成は等しく、1.4 $\mu$ m組成のInGaAsPをIII族組成のみ変えて1.5%の引っ張り歪をかけたものである。圧縮歪InGaAsPウェル層9は、同じ1.4 $\mu$ m組成のInGaAsPから逆に歪をかけて、1.5%の圧縮歪としたものである。(以下、歪をかけるときIII族組成のみ変えるという表記を略する。)圧縮歪InGaAsPウェル層9の厚さは4.5nm、引っ張り歪InGaAsPバリア層10の厚さは10nmとする。このような構造を採用することによって、ウェル層9内のヘビーホール準位とバリア層10内のライトホール準位は、いずれもバンド端から20~25meVの位置にあって、これらのエネルギー準位をほぼ等しくすることができる。

【0058】グレーデッド引っ張り歪InGaAsP SCH層12は、1.21 $\mu$ m組成InGaAsPから0.9%引っ張り歪をかけたものと、1.11 $\mu$ m組成InGaAsPから0.5%引っ張り歪をかけたもの

を、15nmずつ組み合わせたものである。

【0059】このようなバンドラインナップを採用した光変調器では、10Gb/s動作、2Vバイアスでの消光比14dBと、光通信にとって十分な特性が得られた。

【0060】[第2の実施形態]次に、本発明の第2の実施の形態について図面を参照して説明する。

【0061】ここでは、1.3 $\mu$ m帯半導体レーザへの適用例を述べる。図3は、その活性層まわりの層構造である。

【0062】層構造は表面面方位が(100)のn型InP基板4上に、引っ張り歪n-InGaAsP SCH層106、引っ張り歪InGaAsP SCH層7と引っ張り歪InGaAsP SCH層11にはさまれたウェル層数5の歪MQW層8と、その上に引っ張り歪InGaAsP SCH層113、p-InPクラッド層14が積層された構造となっている。

【0063】引っ張り歪n-InGaAsP SCH層106と引っ張り歪InGaAsP SCH層113は、それぞれ、厚さ50nmで、1.13 $\mu$ m組成のInGaAsPから-0.9%歪をかけたものである。

【0064】その内側の引っ張り歪InGaAsP SCH層7と引っ張り歪InGaAsP SCH層11は、厚さ10nmで、1.3 $\mu$ m組成のInGaAsPから1.5%引っ張り歪をかけたものである。圧縮歪InGaAsPウェル層9、引っ張り歪InGaAsPバリア層10は、1.3 $\mu$ m組成のInGaAsPから、それぞれ逆に、+1.5%、-1.5%歪をかけたものである。

【0065】図4は、本構造のバンドダイアグラム図である。ウェル層9の厚さを3.4nm、バリア層10の厚さを7nmにすることにより、ウェル層9のヘビーホール準位とバリア層10のライトホール準位は、いずれもバンド端から約35meV程度のところにあり、エネルギーレベルはほぼ等しくなっている。このため、引っ張り歪InGaAsP SCH層7と引っ張り歪InGaAsP SCH層11にはさまれた歪MQW層8の中では、ヘビーホール状態とライトホール状態が互いに遷移し合うことにより、ホールキャリア輸送はバリアフリーでバルクライクとなる。

【0066】また、SCH層からMQWへのホールキャリア輸送も容易になる構造となっている。引っ張り歪InGaAsP SCH層113に注入されたホールキャリアは、まず、ホールにとってエネルギーの低いライトホールになる。このライトホールのエネルギー準位は、圧縮歪InGaAsPウェル層9のライトホール準位、引っ張り歪InGaAsPバリア層10のヘビーホール準位とほぼ等しいため、容易に歪MQW層8内にホールキャリアが注入されることになる。

【0067】一方電子側は、圧縮歪InGaAsPウェ



ル層9内の電子準位と引っ張り歪InGaAsPバリア層10の伝導帯端とのエネルギー差は約120meVであり、電子を十分に閉じ込めることができる。

【0068】この歪MQW層8の遷移波長は、1.31μmであり、共振器長300μmで30%~75%のコーティングを施せば、閾値電流5mA、スロープ効率0.6W/Aのファブリペローレーザが得られる。

【0069】このようなMQW構造では、通常のMQW構造にあるようなホールキャリアの不均一注入がおこらず、それに伴う実効的な利得飽和も起こらない。また、各ウェル間の輸送時間も無視できる程度に短くなる。このようにして、MQW構造のキャリア輸送起因の変調応答の劣化がなくなるため、ブロック層をFeドープInPのような半絶縁性エピタキシャル層で構成し、低容量化すれば、10Gb/s~40Gb/sの高速デジタル変調が可能となる。このような、超高速の直接変調半導体レーザは、波長チャージングの無視できる短距離での光通信に有効である。

【0070】

【発明の効果】本発明によれば、上述の半導体レーザを上述の光変調器に適用したときに、高速変調時の消光比が10dBから14dBに向上したことである。これは、DC時の消光比と変調時の消光比の差が縮まることにより達成された。

【0071】すなわち、MQW内において、ヘビーホール、ライトホール状態が転換しながらであるが、エネルギー障壁無く、ホールキャリアの移動ができるため、光吸収により発生したホールキャリアが速やかに引き抜かれるためである。同時に、ウェルのヘビーホール準位はバリアのヘビーホール準位の障壁により、量子準位を形成し、これが量子閉じ込めシュタルク効果を起こすため、光吸収の効率は悪化しない。むしろ、本発明の構造をとることにより、電子の量子閉じ込めは十分深くなるため、光吸収の効率は良くなる。

【0072】また、本発明によれば、通常のMQWでは、有効質量の大きいホールキャリアが各ウェルに不均一に注入されるが、本発明のMQW構造では、ホールキャリアはバルクライクに振る舞うため、このような現象が発生しないので、不均一注入による利得飽和がなく、また、各ウェル間のキャリア輸送時間も無視できるようになる。また、本量子井戸構造を半導体レーザに適用したとき、変調応答帯域が伸び、変調帯域を向上することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の光変調器の多重量子井戸構造の一実施の形態を示す断面図である。

【図2】本発明の光変調器の多重量子井戸構造の一実施の形態を示すバンドダイアグラム図である。

【図3】本発明の半導体レーザの多重量子井戸構造の一実施の形態を示す断面図である。

【図4】本発明の半導体レーザの多重量子井戸構造の一実施の形態を示すバンドダイアグラム図である。

【図5】本発明及び従来例による集積型光変調器を示す斜視図である。

【図6】本発明による集積型光変調器の製造工程の一工程図である。

【図7】本発明による図6の次工程図である。

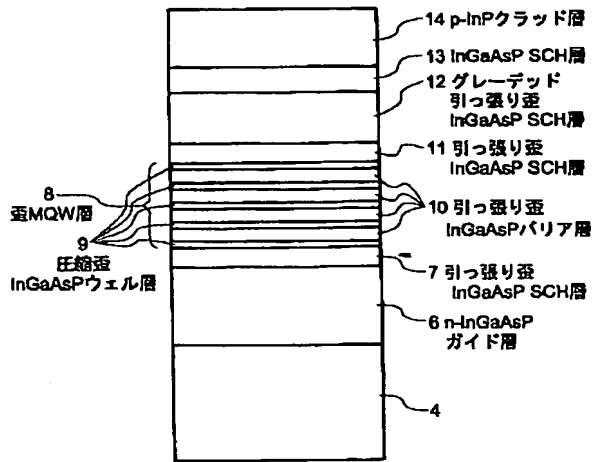
【図8】従来の光変調器の多重量子井戸構造を示す断面図である。

【図9】従来の光変調器の多重量子井戸構造を示すバンドダイアグラム図である。

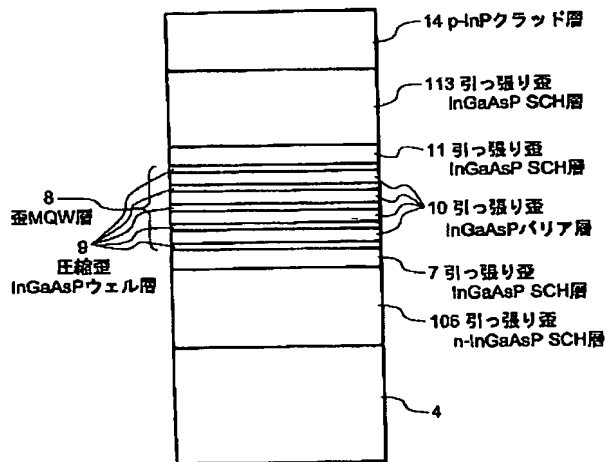
【符号の説明】

- 1 DFBレーザ部
- 2 電極分離部
- 3 変調器部
- 4 n型InP基板
- 5 回折格子
- 6 n-InGaAsPガイド層
- 7 引っ張り歪InGaAsP SCH層
- 8 歪MQW層
- 9 圧縮歪InGaAsPウェル層
- 10 引っ張り歪InGaAsPバリア層
- 11 引っ張り歪InGaAsP SCH層
- 12 グレーデッド引っ張り歪InGaAsP SCH層
- 13 InGaAsP SCH層
- 14 p-InPクラッド層
- 15 二酸化シリコン膜
- 16 ウインドウ部
- 17 p-InP埋込み層
- 18 p-InGaAsPコンタクト層
- 19 p-InGaAsコンタクト層
- 20 二酸化シリコン膜
- 21 ポリイミド
- 22 p側電極
- 23 n側電極
- 24 ARコーティング膜
- 106 引っ張り歪n-InGaAsP SCH層
- 111 InGaAsP SCH層
- 112 グレーデッドInGaAsP SCH層
- 113 引っ張り歪InGaAsP SCH層

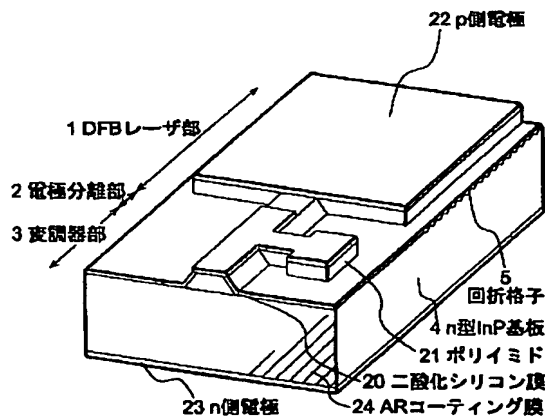
【図 1】



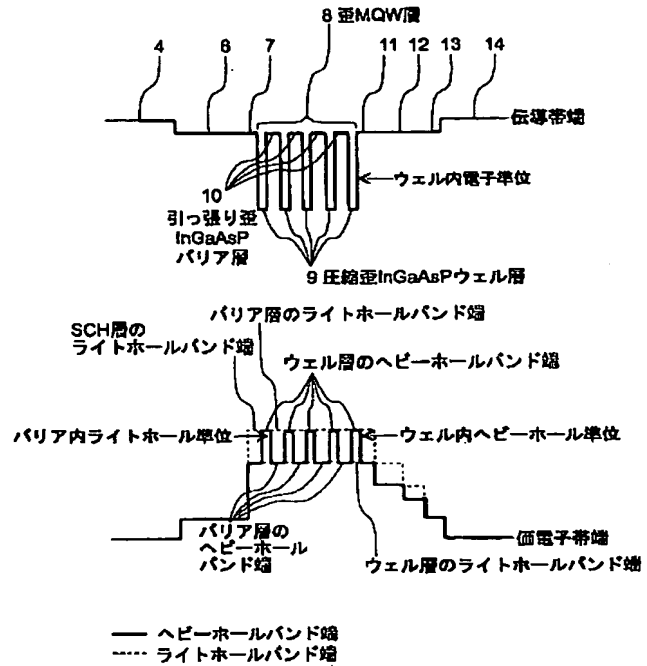
【図 3】



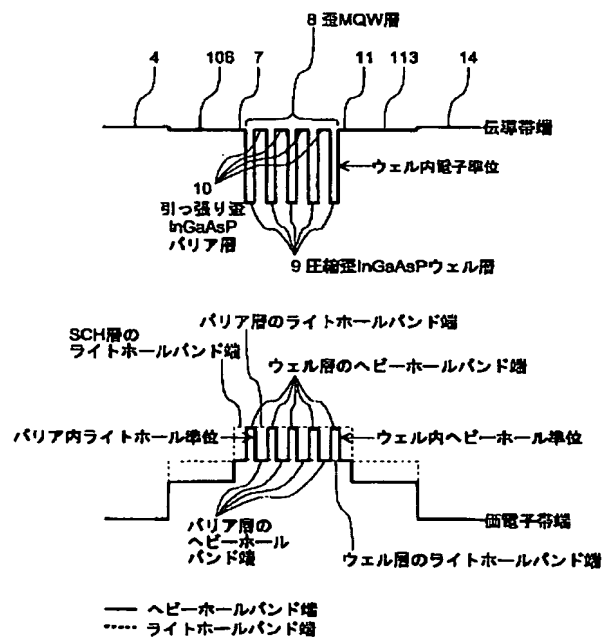
【図 5】



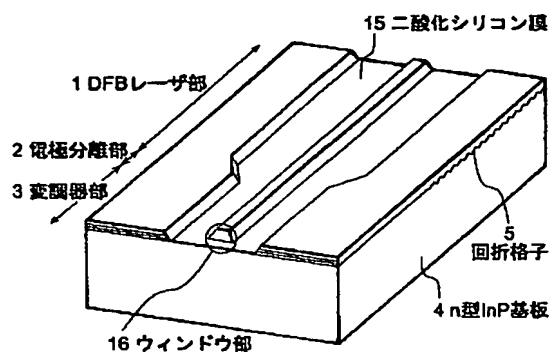
【図 2】



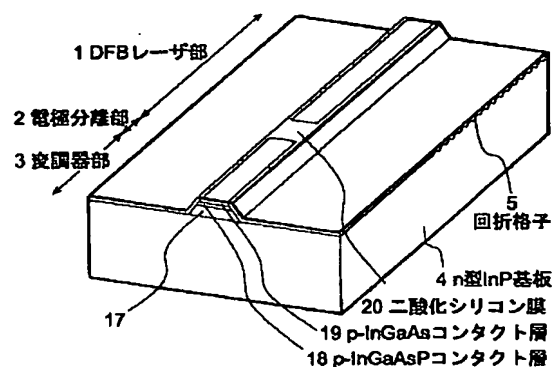
【図 4】



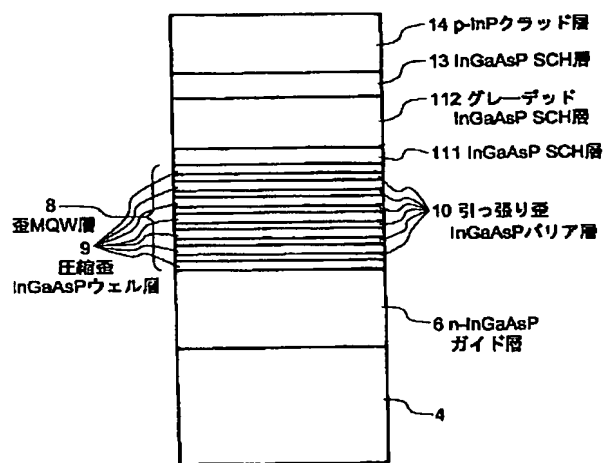
【図 6】



【図 7】



【図 8】



【図 9】

